

BU



**PCT** WELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM  
Internationales Büro  
**INTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE  
INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)**

<p>(51) Internationale Patentklassifikation 6 : <b>B61L 27/00</b></p>	<p><b>A2</b></p>	<p>(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: <b>WO 97/09218</b></p> <p>(43) Internationales Veröffentlichungsdatum: <b>13. März 1997 (13.03.97)</b></p>
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>(21) Internationales Aktenzeichen: <b>PCT/DE96/01498</b></p> <p>(22) Internationales Anmeldedatum: <b>8. August 1996 (08.08.96)</b></p> <p>(30) Prioritätsdaten: <b>195 33 127.3      7. September 1995 (07.09.95)      DE</b></p> <p>(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten ausser US): <b>SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT [DE/DE]; Wiltelsbacherplatz 2, D-80333 München (DE).</b></p> <p>(72) Erfinder; und (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): <b>LAUTHER, Ulrich [DE/DE]; Käthe-Bauer-Weg 6, D-80686 München (DE). ERHARD, Karl-Heinz [DE/DE]; Brunhamstrasse 38, D-81249 München (DE).</b></p> </div> <div style="width: 50%;"> <p>(81) Bestimmungsstaaten: <b>AU, CN, JP, US, europäisches Patent (AT, BE, CH, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).</b></p> <p><b>Veröffentlicht</b> <i>Ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts.</i></p> </div> </div>		

(54) Title: **TRANSPORT MEANS CONTROL PROCESS**

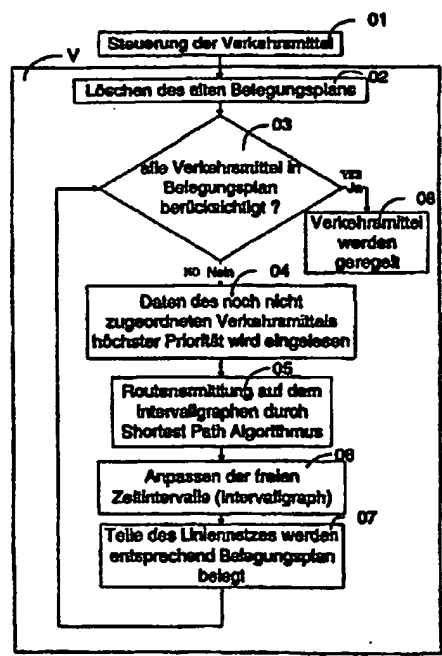
(54) Bezeichnung: **VERFAHREN ZUR REGELUNG VON VERKEHRSMITTELN**

(57) Abstract

To control transport means (Vi) in a predetermined line system (LN) an existing occupation plan (BP') is completely erased and anew one (BP) fully generated so that a transport means (Vi) is allocated to certain time intervals and routes in an interval graph (IG). A shortest path algorithm is used in the allocation of optimum routes and time intervals for the transport means (Vi) concerned. It is thereby possible to attain an overall optimised allocation and control of transport means (Vi) on parts (ZTLNj) of the line system (LN).

(57) Zusammenfassung

Zur Regelung von Verkehrsmitteln (Vi) in einem vorgegebenen Liniennetz (LN) wird jeweils ein schon bestehender Belegungsplan (BP') vollständig gelöscht und komplett ein neuer Belegungsplan (BP) generiert. Die Generierung erfolgt in der Weise, daß jeweils ein Verkehrsmittel (Vi) sequentiell in einem Intervallgraphen (IG) bestimmten Zeitintervallen und Routen zugeordnet wird. Bei der Zuordnung optimaler Routen und Zeitintervalle für das jeweilige Verkehrsmittel (Vi) wird ein Kürzestes-Wege-Verfahren (Shortest Path Algorithm) verwendet. Durch diese Vorgehensweise wird eine globale optimierte Zuordnung und Regelung von Verkehrsmitteln (Vi) auf Teile (TLNj) des Liniennetzes (LN) erreicht.



01. VEHICLE CONTROL  
02. ERASING THE OLD OCCUPATION PLAN  
03. ARE ALL VEHICLES INCLUDED IN THE OCCUPATION PLAN?  
04. DATA ON HIGHEST-PRIORITY VEHICLES NOT YET ALLOCATED READ IN  
05. ROUTE FINDING ON THE INTERVAL GRAPH BY SHORTEST PATH ALGORITHM  
06. MATCHING FREE TIME INTERVALS (INTERVAL GRAPH)  
07. PARTS OF THE LINE SYSTEM OCCUPIED AS PER OCCUPATION PLAN

# **LEDIGLICH ZUR INFORMATION**

Codes zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AM	Armenien	GB	Vereinigtes Königreich	MX	Mexiko
AT	Österreich	GE	Georgien	NE	Niger
AU	Australien	GN	Guinea	NL	Niederlande
BB	Barbados	GR	Griechenland	NO	Norwegen
BE	Belgien	HU	Ungarn	NZ	Neuseeland
BF	Burkina Faso	IE	Irland	PL	Polen
BG	Bulgarien	IT	Italien	PT	Portugal
BJ	Benin	JP	Japan	RO	Rumänien
BR	Brasilien	KE	Kenya	RU	Russische Föderation
BY	Belarus	KG	Kirgisistan	SD	Sudan
CA	Kanada	KP	Demokratische Volksrepublik Korea	SE	Schweden
CF	Zentrale Afrikanische Republik	KR	Republik Korea	SG	Singapur
CG	Kongo	KZ	Kasachstan	SI	Slowenien
CH	Schweiz	LJ	Liechtenstein	SK	Slowakei
CI	Côte d'Ivoire	LK	Sri Lanka	SN	Senegal
CM	Kamerun	LR	Liberia	SZ	Swasiland
CN	China	LK	Litauen	TD	Tschad
CS	Tschechoslowakei	LU	Luxemburg	TG	Togo
CZ	Tschechische Republik	LV	Lettland	TJ	Tadschikistan
DE	Deutschland	MC	Monaco	TT	Trinidad und Tobago
DK	Dänemark	MD	Republik Moldau	UA	Ukraine
EE	Estland	MG	Madagaskar	UG	Uganda
ES	Spanien	ML	Mali	US	Vereinigte Staaten von Amerika
FI	Finnland	MN	Mongolei	UZ	Usbekistan
FR	Frankreich	MR	Mauritanien	VN	Vietnam
GA	Gabon	MW	Malawi		

## Beschreibung

Verfahren zur Regelung von Verkehrsmitteln.

5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren, mit dem es möglich ist, Verkehrsmittel, die in einem vorgegebenen Liniennetz auf vorgegebenen Sequenzen von Start- und Zielpunkten gesteuert werden, in einer Weise mit Hilfe eines Rechners zu regeln, daß  
10 Abweichungen von vorgegebenen Abfahrtszeiten und Ankunftszeiten der Verkehrsmittel möglichst minimiert werden.

Besondere Bedeutung erlangt dieses Anwendungsgebiet bei auftretenden Störungen des Betriebs des Liniennetzes. Bei auf-  
15 tretenden Störungen müssen die Änderungen der Routen bzw. der Fahrplanweisungen für die einzelnen Verkehrsmittel in einer Weise erfolgen, daß die Auswirkungen der Störung auf den gesamten Betrieb des Liniennetzes möglichst gering gehalten werden.

20 Es sind Verfahren zur Bestimmung kürzester Wege (Shortest Path Algorithms) in einem Netzwerkgraphen bekannt (E. Moore, The Shortest Path Through a Maze, In Proceedings International Symposium on the Theory of Switching, Part 2, April 2 -  
25 5, S. 285 - 292, 1957; und E. Dijkstra, A Note on Two Problems in Connexion with Graphs, Numerische Mathematik, Band 1, Springer Verlag, S. 269 bis 271, 1959).

Ein Verfahren zur automatischen Disposition von Zügen ist be-  
30 kannt (H. Schaefer et al, An Expert System for Real-Time Train Dispatching, Railway Operations, Computers in Railways 4, Volume 2, COMPRAIL 94, T. Murthy et al (editors), Computational Mechanics Publications, Southampton, ISBN 1-85312-359-5, S. 27 bis 34, 1994). Dieses Verfahren basiert auf Konflik-  
35 terkennung und Konfliktlösung. In diesem Zusammenhang liegt ein Konflikt vor, wenn die Fahrplanabweichungen so groß sind, daß die Abwicklung des Fahrbetriebs gemäß einem vorgegebenen

Sollfahrplan nicht mehr möglich ist. Die Lösung der Konflikte erfolgt hier mit Hilfe einer Wissensbasis (Entscheidungsregeln).

- 5    Nachteilig an diesem Verfahren ist, daß dieses Verfahren speziell für Gleisstrecken konzipiert wurde und außerdem nur räumlich lokale Optimierungsstrategien verfolgt. Auch die Tatsache, daß dieses Verfahren auf einer Konflikterkennung basiert, das heißt daß dieses Verfahren nur durchgeführt  
10 wird, wenn ein Konflikt erkannt wird und nicht beispielsweise in periodischen Zeitabständen, führt dazu, daß mögliche Optimierungschancen bei der Disposition ohne auftretende Konfliktsituationen in diesem Fall nicht genutzt werden.
- 15    Ein weiteres konfliktbasiertes Verfahren ist aus (K. Komaya et al, Estrac-III: An Expert System for Train Traffic Control in Disturbed Situations, Control, Computers, Communications in Transportation - Selected Papers from the IFAC/IFIP/IFORS Symposium Programm, Oxford, UK, S. 147 bis 153, 1989) be-  
20 kannt. Das Verfahren verwendet zur Konfliktlösung ebenfalls lokale Entscheidungsregeln. Die Nachteile, die für das vorige Verfahren beschrieben wurden, gelten selbstverständlich ebenfalls für dieses Verfahren, da dieses Verfahren auf denselben Grundprinzipien beruht, der Konflikterkennung und Konfliktlö-  
25 sung.
- Ein Verfahren, welches ebenfalls auf Konflikterkennung und Konfliktlösung basiert, aber zur Lösung sogenannte Branch-and-Bound-Verfahren verwendet ist bekannt (R. Sauder, Computer Aided Train Dispatching: Decision Support through Optimization, INTERFACES 13, S. 24 bis 37, Dezember 1993). Das  
30 Verfahren weist die gleichen Nachteile auf wie die im vorigen beschriebenen Verfahren.
- 35    Der Erfindung liegt das Problem zugrunde, ein Verfahren zur Regelung von Verkehrsmitteln mit Hilfe eines Rechners anzugeben, das die im vorigen beschriebenen Nachteile vermeidet.

Das Problem wird durch das Verfahren gemäß Patentanspruch 1 gelöst.

- 5 Im Gegensatz zu den Verfahren, die auf Konflikterkennung und Konfliktlösung das Verhalten des Disponenten in einem Expertensystem nachbilden, verfolgt das erfindungsgemäße Verfahren eine grundsätzlich andere Zielrichtung.
- 10 Durch das Verfahren wird eine weitgehend automatische und global optimierte Regelung von Verkehrsmitteln erreicht; IM Gegensatz zu den lokalen Entscheidungsregeln der bekannten Verfahren.
- 15 Anhand eines vorgegebenen Liniennetzes und anhand von vorgegebenen Ankunfts- und Abfahrtszeiten der Verkehrsmittel von verschiedenen Haltestellen der Verkehrsmittel sowie von vorgegebenen Sequenzen von Start- und Zielpunkten wird ein Belegungsplan erstellt. Dieser Belegungsplan wird vor jeder Neu-
- 20 erstellung komplett gelöscht, und neu generiert.

Die einzelnen Verkehrsmittel werden bei der Generierung des Belegungsplans, durch den Teile des Liniennetzes für bestimmte Zeitintervalle den einzelnen Verkehrsmitteln zugeordnet

25 werden, sequentiell gemäß ihrer Priorität zugeordnet. Bei der Zuordnung der einzelnen Verkehrsmittel auf den Belegungsplan werden die noch unbelegten Zeitintervalle in Form eines Intervallgraphens dargestellt und auf diesen Intervallgraphen wird ein sogenanntes Kürzestes-Wege-Verfahren, auch als Shortest Path Algorithm bezeichnet, angewendet, um eine optimale

30 Route durch die noch unbelegten Zeitintervalle für das jeweilige Verkehrsmittel zu ermitteln.

Wenn ein Verkehrsmittel einem Zeitintervall und einer Route

35 zugeordnet wurde, wird der Belegungsplan für die einzelnen Teile des Liniennetzes angepaßt, die nun von dem Verkehrsmittel zu den jeweiligen Zeitintervallen belegt werden.

Die Vorteile des Verfahrens sind vor allem darin zu sehen, daß eine schnelle Ermittlung von zulässigen und optimierten Routen der Verkehrsmittel ermöglicht wird. Weiterhin ist diese Optimierung nicht auf lokale Optimierungsstrategien beschränkt, sondern berücksichtigt vor allem durch die vollständige Löschung des alten Belegungsplanes jeweils bei der Generierung eines neuen Belegungsplans die globale Situation in dem gesamten Liniennetz. Außerdem ist das Verfahren keine Speziallösung für Gleisstrecken, sondern kann ganz generell für jede Art von Netzen angewendet werden, deren Teile in Streckenabschnitte unterteilt sind. Diese breite Anwendbarkeit zeigt sich auch in der Tatsache, daß das Verfahren auch in der Regelung von Flugzeugen angewendet werden kann.

Durch die Weiterbildung des Verfahrens gemäß Patentanspruch 2 ist es möglich, eventuell auftretende Störungen in einem Liniennetz sofort zu erkennen und in einer Neugenerierung des Belegungsplanes zu berücksichtigen, um die Auswirkungen der aufgetretenen Störungen auf das gesamte Liniennetz zu minimieren.

Durch die Weiterbildung des Verfahrens gemäß Patentanspruch 8 wird das erfindungsgemäße Verfahren weiter verbessert, da Zeitlücken, die nur geringfügig zu klein sind, um von einem Verkehrsmittel auf einer Route belegt werden zu können, noch weiter optimiert werden, so daß schon verplante Zeitintervalle bis zu einem gewissen Grad verschoben werden, um freie Zeitintervalle zu vergrößern und somit schnell eine verbesserte Regelung der Verkehrsmittel zu ermöglichen.

Mit der Weiterbildung des Verfahrens gemäß Patentanspruch 13 werden unterschiedliche Nebenbedingungen bei der Generierung des Belegungsplans berücksichtigt, wodurch die Regelung weiter verbessert wird.

Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

Ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel der Erfindung ist in den  
5 Figuren dargestellt und wird im folgenden näher beschrieben.

Es zeigen

10 Figur 1 ein Ablaufdiagramm, in dem einzelne Verfahrensschritte des Verfahrens dargestellt sind;

15 Figur 2 ein Ablaufdiagramm, in dem einige zusätzliche Verfahrensschritte, die zur Kompaktierung des Belegungsplans dienen, beschrieben sind;

Figur 3 eine Skizze, in der ein Liniennetz eines einfachen Ausführungsbeispiels mit vier Teilen dargestellt ist;

20 Figur 4 ein Zeitdiagramm (Belegungsplan) für die vier Teile des in Figur 3 dargestellten Liniennetzes, in dem eine mögliche Belegung des Liniennetzes durch Verkehrsmittel dargestellt ist;

25 Figuren 5a und b eine Skizze, in dem ein Sollfahrplan von vier Zügen in einem Liniennetz eines zweiten Ausführungsbeispiels und ein Zustand dargestellt ist, der sich bei nicht vorhandener Regelung einstellt, wenn sich ein Zug verspätet;

30 Figuren 6a und b Skizzen, in denen zum einen eine Regelung, dargestellt ist, die sich ergibt bei Verwendung bekannter Verfahren, die auf Konflikterkennung und Konfliktlösung basieren, (Figur 6a) sowie eine Lösung, die sich durch Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens beispielsweise ergeben kann (Figur 6b);  
35

Figur 7 ein Zeitdiagramm (Belegungsplan) für die vier Teile des Liniennetzes des ersten Ausführungsbeispiels, mit einer intuitiven Darstellung der freien Zeitintervalle des Belegungsplans in Form eines Intervallgraphen, der zehn Knoten und fünf Kanten aufweist;

Figur 8 einen Belegungsplan und einen Verschiebegraphen.

Anhand der Figuren 1 bis 8 wird das Verfahren weiter erläutert.

In Figur 1 sind in Form eines Ablaufdiagramms einzelne Verfahrensschritte dargestellt.

Zu regelnde Verkehrsmittel  $V_i$  werden in einem Liniennetz LN gesteuert 01. Ein Index  $i$  bezeichnet jedes Verkehrsmittel  $V_i$  eindeutig und ist eine natürliche Zahl im Bereich von 1 bis  $m$ , wobei eine natürliche Zahl  $m$  die Anzahl der sich in dem Liniennetz LN befindenden bzw. zu steuernden Verkehrsmittel  $V_i$  angibt.

Jedem Verkehrsmittel  $V_i$  sind vorgegebene Ankunftszeiten und vorgegebene Abfahrtszeiten für jede Haltestelle, die das jeweilige Verkehrsmittel  $V_i$  anfahren soll, zugeordnet.

Außerdem sind jedem Verkehrsmittel  $V_i$  auch Sequenzen von Start- und Zielpunkten vorgegeben, die jedes Verkehrsmittel  $V_i$  jeweils zu befahren hat.

Eine eventuell schon existierende Zuordnung von Verkehrsmitteln  $V_i$  auf Teile  $TLN_j$  des Liniennetzes LN zu bestimmten Zeitintervallen, die in einem Rechner gespeichert ist, also ein alter Belegungsplan  $BP'$ , wird gelöscht 02. Ein zweiter Index  $j$  bezeichnet jeweils einen Teil  $TLN_j$  des Liniennetzes LN eindeutig und ist eine natürliche Zahl im Bereich von 1 bis  $n$ , wobei die natürliche Zahl  $n$  die Anzahl der Teile  $TLN_j$  des Liniennetzes LN angibt.



Die Zuordnung, die im weiteren als Belegungsplan BP bezeichnet wird, wird in den folgenden Verfahrensschritten iterativ neu generiert. Solange noch nicht alle Verkehrsmittel Vi in dem Belegungsplan BP berücksichtigt wurden 03, werden jeweils sequentiell für ein Verkehrsmittel Vi folgende Schritte durchgeführt:

Ein Verkehrsmittel Vi mit der höchsten Priorität der noch nicht in dem Belegungsplan BP berücksichtigten Verkehrsmittel Vi wird ausgewählt und in einen Speicher des Rechners eingelesen 04.

In einem weiteren Schritt 05 wird auf einen Intervallgraphen IG mit Hilfe eines Kürzesten-Wege-Verfahren (Shortest Path Algorithm) eine optimale Route für das jeweils zuzuordnende Verkehrsmittel Vi zu dem Belegungsplan, also den Teilen TLNj des Liniennetzes LN als auch zu den jeweiligen Zeitintervallen, in denen das Verkehrsmittel Vi diesen Teil TLNj jeweils benötigt, ermittelt.

In einem folgenden Schritt 06 wird der Intervallgraph IG in Bezug auf die Teile TLNj des Liniennetzes LN, die in dem vorigen Schritt 05 für das jeweiligen Verkehrsmittel Vi „belegt“ wurden, angepaßt, indem jeweils ein bisher freies Zeitintervall nunmehr entweder in zwei neue, kleinere, freie Zeitintervalle aufgeteilt wird oder, wenn das freie Zeitintervall komplett für das Verkehrsmittel Vi „belegt“ wurde, gelöscht wird.

In einem letzten Schritt 07, der für alle Verkehrsmittel Vi durchgeführt wird, werden die von dem Verkehrsmittel Vi benötigten Teile TLNj des Liniennetzes LN zu den benötigten Zeitintervallen endgültig belegt.

Wenn alle Verkehrsmittel  $V_i$  in dem Belegungsplan BP berücksichtigt wurden 03, werden alle Verkehrsmittel  $V_i$  entsprechend dem neu entstandenen Belegungsplan BP geregelt 08.

- 5 Das Liniennetz LN wird innerhalb des Rechners in Form eines ungerichteten Netzwerkgraphens, bestehend aus Knoten und Kanten, dargestellt.

- 10 Ein Knoten des ungerichteten Netzwerkgraphens repräsentiert in diesem Zusammenhang beispielsweise eine Weiche, falls es sich bei den Verkehrsmitteln  $V_i$  eventuell um schienengebundene Fahrzeuge handelt, ein Signal, oder einen Punkt, an dem eine Änderung der maximal zulässigen Geschwindigkeit des Verkehrsmittels  $V_i$  auftritt.

- 15 Eine Kante des ungerichteten Netzwerkgraphens repräsentiert jeweils einen Teil  $TLN_j$  des Liniennetzes LN (vgl. Figur 3).

- 20 Zwei Teile  $TLN_j$  des Liniennetzes LN stehen zueinander in Konflikt, wenn sie nicht gleichzeitig belegt werden können, beispielsweise wenn sie sich kreuzen oder wenn ein sogenannter Flankenschutz verwendet wird. Auch zwei Teile  $TLN_j$  des Liniennetzes LN einer starren Kreuzung bilden ein Konfliktpaar. Alle Konflikte sind durch einen gerichteten Konfliktgraphen 25 modelliert. Der Konfliktgraph ist gerichtet, um auch Durchrutschwege und rückwärtige Auflösungen von Teilen  $TLN_j$  des Liniennetzes LN beschreiben zu können.

- 30 Eine Route wird repräsentiert durch die Angabe eines Startknotens des ungerichteten Netzwerkgraphens und eines Zielknotens des ungerichteten Netzwerkgraphens.

- 35 Damit es möglich ist, auch Umlaufbeziehungen zu berücksichtigen, bei der Verwendung des Verfahrens für schienengebundene Verkehrsmittel  $V_i$  bedeutet dies beispielsweise wendende Verkehrsmittel  $V_i$ , werden in diesem Fall für das jeweilige Verkehrsmittel  $V_i$  mehrere Routen definiert, welche voneinander

abhängig gemacht werden. Die Routenabhängigkeiten werden an einem gerichteten Routengraphen beschrieben. In diesem Routengraphen können ebenso Anschlußbeziehungen zwischen den Verkehrsmitteln  $V_i$ , also Routenabhängigkeiten zwischen verschiedenen Verkehrsmitteln  $V_i$ , berücksichtigt werden.

Der Belegungsplan BP repräsentiert sowohl das „Sollverhalten“ als auch „Istverhalten“ der einzelnen Verkehrsmittel  $V_i$ . Der Belegungsplan BP weist eine Menge von Zeitintervallen auf. Dabei verkörpert ein bestimmtes Zeitintervall die zeitliche Belegung einer bestimmten Kante, also eines bestimmten Teils  $TLN_j$  des Liniennetzes LN im ungerichteten Netzwerkgraphen durch ein bestimmtes Verkehrsmittel  $V_i$ . Die freien Zeitintervalle des Belegungsplans BP werden in Form des Intervallgraphen IG dargestellt.

Besitzt eine Kante zu einer anderen Kante Konflikte, sogenannte Konfliktkanten, dann wird durch den Rechner für jedes Zeitintervall, für das ein Konflikt besteht, ein Konfliktintervall  $k_i$  generiert.

In Figur 3 ist ein einfaches Liniennetz LN mit vier Teilen  $TLN_j$ ,  $j = 1..4$ , dargestellt.

Dieses erste Ausführungsbeispiel dient nur zur Verdeutlichung des Verfahrens und schränkt die allgemeine Verwendbarkeit auf eine beliebige Anzahl von Teilen  $TLN_j$  des Liniennetzes LN, sowie eine beliebige Struktur des Liniennetzes LN als auch eine beliebige Anzahl von Verkehrsmitteln  $V_i$ , die sich in dem Liniennetz LN befinden, in keinster Weise ein.

Für das erste Ausführungsbeispiel wird in Figur 4 eine mögliche Belegung in einem von einer Zeit  $t$  abhängigen Diagramm, dem Belegungsplan BP, dargestellt.

Hierbei durchfährt ein zweites Verkehrsmittel  $V_2$  die Teile  $TLN_2$ ,  $TLN_3$  und  $TLN_4$  das Liniennetz LN in genau dieser Reihen-

folge. Ein erstes Verkehrsmittel V1 durchquert ausschließlich den ersten Teil TLN1 des Liniennetzes LN. Da sich der erste Teil TLN1 und der dritte Teil TLN3 des Liniennetzes LN kreuzen (vgl. Figur 3), stehen diese beiden Teile TLN1, TLN3 des Liniennetzes LN gegenseitig in Konflikt.

Dies bedeutet, TLN1 ist Konfliktkante von TLN3 und TLN3 ist Konfliktkante von TLN1. Infolgedessen wird der Belegung für den dritten Teil TLN3 des Liniennetzes LN ein Konfliktintervall  $ki_3$  von dem ersten Verkehrsmittel V1 durch den Rechner zugewiesen. Das Konfliktintervall  $ki_3$  weist dieselben Zeitwerte wie das Zeitintervall auf, das dem ersten Teil TLN1 in der Belegung für das erste Verkehrsmittel V1 zugeordnet wird.

Ein Warteintervall W beschreibt ein Zeitintervall, währenddessen das zweite Verkehrsmittel V2 auf dem zweiten Teil TLN2 des Liniennetzes LN warten muß, bis es in den dritten Teil TLN3 „einfahren“ darf, da erst dann der Konflikt, der sich aus dem ersten Verkehrsmittel V1 durch Kreuzung des ersten Teils TLN1 mit dem dritten Teil TLN3 des Liniennetzes LN ergeben hat, wieder aufgelöst wurde.

Weiterhin ist entsprechend der im vorigen beschriebenen Vorgehensweise in Figur 4 ein erstes Konfliktintervall  $ki_1$  dargestellt, da in diesem Zeitintervall der dritte Teil TLN3 des Liniennetzes LN von dem ersten Verkehrsmittel V1 „belegt“ ist, und somit dem ersten Teil TLN1, da der erste Teil TLN1 eine Konfliktkante des dritten Teils TLN3 des Liniennetzes LN darstellt, ein Konfliktintervall zugeordnet werden muß.

Wie im vorigen beschrieben wurde, wird ein alter, eventuell schon vorhandener Belegungsplan BP' bei Neugenerierung des Belegungsplans BP vollständig gelöscht 02.

In Figur 7 ist der Belegungsplan BP in Form eines Intervallgraphen IG dargestellt. Es werden allen verfügbaren, also freien Zeitintervallen in den Belegungsplan BP durch Knoten

repräsentiert, denen die Angabe des jeweiligen Zeitintervalls als Attribut zugeordnet wird.

- 5 Kanten werden in dem Intervallgraphen IG genau dann eingeführt, wenn eine Fahrt zwischen den beiden zugehörigen Zeitintervallen möglich ist.

- 10 Hierbei werden zeitliche Bedingungen, beispielsweise die Überlappung freier Zeitintervalle und topologische Bedingungen, beispielsweise Übergangsmöglichkeiten zwischen den Schenkeln einer Weiche bei Verwendung des Verfahrens für schienengebundene Verkehrsmittel  $V_i$ , berücksichtigt und in einheitlicher Weise beschrieben.

- 15 Auf den so entstandenen Intervallgraphen IG wird für das jeweils gerade zuzuordnende Verkehrsmittel  $V_i$  ein Kürzestes-Wege-Verfahren (Shortest Path Algorithm) unter Berücksichtigung des Startpunktes des Verkehrsmittels  $V_i$  und des Ziel-  
20 punktes des Verkehrsmittels  $V_i$  und der Haltestellen des Verkehrsmittels  $V_i$  angewendet.

- Beispiele für Kürzeste-Wege-Verfahren sind bekannt (E. Moore, The Shortest Path Through a Maze, In Proceedings International Symposium on the Theory of Switching, Part 2, April 2 -  
25 5, S. 285 bis 292, 1957; und E. Dijkstra, A Note on Two Problems in Connexion with Graphs, Numerische Mathematik, Band 1, S. 269 bis 271, 1959).

- 30 Weitere Verfahren zur Bestimmung eines kürzesten Weges in einem Netzwerkgraphen können ebenso ohne Einschränkung in diesem Verfahren eingesetzt werden.

- Auf diese Weise wird für jedes Verkehrsmittel  $V_i$  entsprechend seiner ihm zugeordneten Priorität eine zeitkürzeste, zulässige Route ermittelt. Die Reihenfolge der Verkehrsmittel  $V_i$  zur  
35 Zuordnung innerhalb des Belegungsplanes BP wird gemäß den

Prioritäten, die den Verkehrsmitteln Vi zugeordnet werden, festgelegt.

Die Prioritäten der Verkehrsmittel Vi dienen desweiteren als Gewichte im Rahmen einer im weiteren beschriebenen Zielfunktion.

Nachdem ein Verkehrsmittel Vi anhand des Intervallgraphen IG dem Belegungsplan BP neu zugeordnet wurde, muß natürlich auch der Intervallgraph IG entsprechend der neuen Belegung angepaßt werden 06. Dies bedeutet, daß für den Fall, daß ein Verkehrsmittel Vi einen Teil eines freien Zeitintervalls belegt, dieses freie Zeitintervall aufgeteilt wird in entweder zwei neue, kleinere freie Zeitintervalle, die dann den durch das Verkehrsmittel Vi belegten Zeitraum „umschließen“, oder, wenn sich das neu belegte Zeitintervall direkt an ein schon belegtes Zeitintervall anschließt, nur ein neues freies Zeitintervall gebildet wird. Falls das zugeordnete Zeitintervall das bisher als frei deklarierte Zeitintervall vollständig überdeckt, wird kein neues freies Zeitintervall gebildet.

Im Anschluß daran werden die Teile TLNj mit den entsprechenden Zeitintervallen für das jeweilige Verkehrsmittel Vi endgültig belegt 07.

Wenn der Belegungsplan BP vollständig generiert wurde, werden die Verkehrsmittel Vi in einem letzten Schritt geregelt 08 entsprechend den Vorgaben, die sich aus dem Belegungsplan BP ergeben, welche beispielsweise zusätzliche Wartezeiten, wie in Figur 3 mit dem Warteintervall W angedeutet ist, aufweisen kann.

Die Regelung der Verkehrsmittel Vi kann auf mehrere Arten erfolgen, so ist es beispielsweise vorgesehen, daß die Verkehrsmittel Vi unter Umständen wie in Figur 3 dargestellt, an einem Haltepunkt für ein bestimmtes Zeitintervall angehalten werden, bis sie wieder weiterfahren dürfen.

Ein Vorteil des Verfahrens liegt darin, daß unterschiedliche Anforderungen von verschiedenen Liniennetzen LN ohne weiteres in das Modell der verschiedenen Graphen berücksichtigt werden  
5 können.

Beispielsweise ist es durch einfaches Hinzufügen bzw. Ändern von Kanten möglich, einen eventuell vorgesehenen Gleiswechselbetrieb für bestimmte Teile TLN<sub>j</sub> des Liniennetzes LN bei  
10 Verwendung des Verfahrens für schienengebundene Verkehrsmittel Vi, vorzusehen. Hierzu ist es lediglich notwendig, den vorgesehenen Teil TLN<sub>j</sub>, für den jeweils ein Gleiswechselbetrieb, das heißt ein Ausweichen auf eine durch eine Kante modellierte Schiene, die für eine andere Richtung derselben  
15 Strecke vorgesehen ist, für ein bestimmtes Zeitintervall freizugeben.

Eine weitere einfache Variante, die in dem Verfahren berücksichtigt werden kann, liegt in der Regelung der Verkehrsmittel Vi durch Veränderung der Geschwindigkeiten auf den einzelnen Teilen TLN<sub>j</sub> des Liniennetzes LN. Die Änderung der Geschwindigkeiten wird in dem Intervallgraphen IG dann berücksichtigt durch entsprechende Anpassung der freien Zeitintervalle in dem Belegungsplan BP.

25 Wie im vorigen beschrieben wurde, erfolgt die Zuordnung der Verkehrsmittel Vi zu den Teilen TLN<sub>j</sub> des Liniennetzes LN in der Reihenfolge der Priorität der einzelnen Verkehrsmittel Vi. Die Priorität der Verkehrsmittel Vi ist ein Wert, der aus  
30 mindestens einer der folgenden Kriterien ermittelt wird:

- die Verkehrsmittel als solche können unterschiedliche Bedeutung im Rahmen des gesamten Verkehrsnetzes zugeordnet bekommen; so kann es beispielsweise sein, daß die Bedeutung  
35 eines Verkehrsmittels Vi, das Personen transportiert, größer ist als die Bedeutung eines Verkehrsmittels Vi, das Gü-

ter transportiert, oder eben auch umgekehrt, je nach Anwendung;

- 5       - die Geschwindigkeiten der einzelnen Verkehrsmittel Vi können ebenso in die Priorität des jeweiligen Verkehrsmittels Vi einfließen;
- 10       - auch die Startzeiten der einzelnen Verkehrsmittel Vi können berücksichtigt werden bei der Bildung der Priorität der Verkehrsmittel Vi;
- 15       - ebenso wie die Startzeit, also die Abfahrtszeit des Verkehrsmittels Vi kann auch eine gewünschte Ankunftszeit eine große Bedeutung in einer bestimmten Anwendung erlangen, die dann ebenso in die Priorität des Verkehrsmittels Vi einfließt;
- 20       - allgemein kann ebenso von Bedeutung sein, daß eine sehr große Verspätung eines einzelnen Verkehrsmittels Vi sehr unerwünscht ist, was durch Berücksichtigung dieses Effekts in der Priorität einfließen kann.

25       Die bisher beschriebene, sequentielle Zuordnung der Verkehrsmittel Vi hat die charakteristische Eigenschaft, daß schon „vergebene“ Zeitintervalle nicht mehr geändert, beispielsweise verschoben, werden dürfen. Dies kann einen relativ großen Verschnitt im Belegungsplan BP zur Folge haben, weil freie Zeitintervalle, die nur geringfügig zu klein sind, um von einem noch nicht in dem Belegungsplan BP berücksichtigten Verkehrsmittel Vi belegt zu werden, nicht ausgenutzt werden.

35       Die Weiterbildung des Verfahrens, die im folgenden beschrieben wird, verbessert das Verfahren zusätzlich hinsichtlich dieses Problems, in dem zugelassen wird, daß schon verplante Zeitintervalle bis zu einem gewissen Grad noch verschoben werden dürfen.



Ein eventuell vorgegebener zeitlicher Sicherheitsabstand zwischen zwei Verkehrsmitteln  $V_i$  auf einem Teil  $TLN_j$  des Linien-  
netzes  $LN$  wird bei der Weiterbildung dieses Verfahrens zu-  
nächst reduziert 20 (vgl. Figur 2). Das Verfahren  $V$  wird nun  
5 komplett unter Berücksichtigung des reduzierten Sicherheits-  
abstands durchgeführt.

Aufgrund des zu geringen Sicherheitsabstandes ist der resul-  
tierende Belegungsplan  $BP$  inkonsistent. Um ihn wieder konsi-  
10 stent zu machen, werden Zeitintervalle verschoben. Dazu wird  
zunächst ein gerichteter Verschiebegravh  $vg$  generiert, um  
formal zu beschreiben, welche Zeitintervalle verschoben wer-  
den müssen, wenn ein bestimmtes Zeitintervall verschoben wird  
22.

15 In einem davor durchgeführten Schritt 21 wird der Sicher-  
heitsabstand wieder auf den vor der Reduzierung festgesetzten  
Wert zurückgesetzt.

20 Nun wird der Verschiebegravh  $vg$  dekomprimiert 23, das heißt  
der resultierende Belegungsplan ist nun konsistent. Da hier-  
bei Zeitintervalle möglicherweise zu weit in die Zukunft ver-  
schoben werden, wird in einem weiteren Schritt eine Kompak-  
tierung des Verschiebegravhs  $vg$  durchgeführt 24. In diesem  
25 Schritt werden die Zeitintervalle soweit wie möglich nach  
links verschoben.

Das Ergebnis ist ein konsistenter und optimaler Belegungs-  
plan, optimal unter der Voraussetzung, daß die Route für je-  
30 des Verkehrsmittel  $V_i$  sowie die Reihenfolge der Verkehrsmit-  
tel  $V_i$  für jede Kante bereits optimal festgelegt wurden.

In einem letzten Schritt werden nun noch die neuen Zeitwerte  
für die Zeitintervalle aus dem Verschiebegravh  $vg$  entnommen  
35 und der Belegungsplan  $BP$  entsprechend angepaßt 25.

Ausgangspunkt für die Generierung des Verschiebegraphen  $vg$  ist der Belegungsplan BP.

- Jeder Knoten  $v$  des Verschiebegraphs  $vg$  repräsentiert den Beginn eines Zeitintervalls im Belegungsplan BP. Dieser Zeitwert gibt den Zeitpunkt an, zu dem die Spitze des Verkehrsmittels  $V_i$  den zum Zeitintervall zugehörigen Teil  $TLN_j$  des Liniennetzes  $LN$  befährt.
- 10 Eine gerichtete Kante  $e$  in dem Verschiebegraphen  $vg$  beschreibt jeweils, daß der Zeitwert des Zielknotens der gerichteten Kante  $e$  mindestens so groß sein muß wie der Zeitwert des Anfangsknotens der gerichteten Kante  $e$ .
- 15 Es werden folgende Parameter für die Knoten  $v$  und die Kanten  $e$  verwendet. Der Index  $v$  und der Index  $e$  sind beliebige natürliche Zahlen, die jeweils einen Knoten  $v$  bzw. eine Kante  $e$  eindeutig identifizieren. Die Zahlen liegen in dem Bereich zwischen 1 und jeweils der Anzahl der in dem Verschiebegraphen  $vg$  vorkommenden Knoten  $v$  bzw. Kanten  $e$ .
- 20 Folgende Parameter werden für die Knoten  $v$  und die Kanten  $e$  verwendet:
- 25 -  $time(v)$ : aktueller Zeitwert des Knotens  $v$ , beispielsweise in Sekunden;
- $mintime(v)$ : untere Schranke für den Zeitwert des Knotens  $v$ , beispielsweise in Sekunden;
- 30 -  $movable(v)$ : Angabe, ob der Zeitwert, der dem Knoten  $v$  zugeordnet ist, geändert werden darf oder nicht;
- 35 -  $cost(e)$ : Zeitwert des Zielknotens der gerichteten Kante  $e$  muß mindestens so groß sein wie der Zeitwert des Anfangsknotens der jeweiligen gerichteten Kante  $e$  plus  $cost(e)$ .

Der Parameter  $\text{mintime}(v)$  wird eingeführt, um beispielsweise Abfahrtszeiten von Verkehrsmitteln  $V_i$  in Zwischenhaltestellen zu beschreiben, das heißt es soll berücksichtigt werden, daß das Verkehrsmittel  $V_i$  nicht vor einer vorgegebenen Zeit von  
5 der Zwischenhaltestelle abfahren darf.

Der Parameter  $\text{movable}(v)$  wird eingeführt, um z. B., bei Verwendung des Verfahrens für schienengebundene Verkehrsmittel  $V_i$ , Gleissperren zu modellieren. In diesem Fall dürfen die  
10 Zeitwerte einer Gleissperre nicht geändert werden.

Desweiteren dürfen Zeitintervalle, die in der Vergangenheit liegen, nicht verschoben werden.

15 Die Kanten des Verschiebungsgraphen  $vg$  werden auf folgende Weise generiert:

Zur Erläuterung wird ein bestimmtes Zeitintervall  $z$ , welches in der vorgegebenen Route des Verkehrsmittels  $V_i$  und im Liniennetz  $LN$  enthalten ist eingeführt. Es werden weiterhin folgende Größen eingeführt:

- 25 - ein folgendes Zeitintervall  $gn(z)$ , das dem Zeitintervall  $z$  in dem Liniennetz  $LN$  direkt folgt;
- ein weiteres folgendes Zeitintervall  $zn(z)$ , welches das dem Zeitintervall  $z$  direkt folgende Zeitintervall in den vorgegebenen Fahrzeiten des Verkehrsmittels  $V_i$  beschreibt sowie ein vorangegangenes Zeitintervall  $zp(z)$ , welches das dem  
30 Zeitintervall  $z$  direkt vorangegangene Zeitintervall in den vorgegebenen Fahrzeiten des Verkehrsmittels  $V_i$  darstellt.

Hat eine Kante  $e$  eine Konfliktkante, dann wird das zum Zeitintervall  $z$  gehörige Konfliktintervall mit  $kiz$  bezeichnet.

35 Der Mindestabstand zwischen zwei Zeitintervallen, welche derselben Kante  $e$ , aber verschiedenen Verkehrsmitteln  $V_i$  zugeord-

net wird, beispielsweise also ein Sicherheitsabstand, wird mit  $zs$  bezeichnet.

Es werden jeweils neue Kanten ermittelt, die einen Zielknoten  $t$  der jeweils neuen Kante und einen Anfangsknoten  $u$  der jeweils neuen Kante aufweisen.  $cost(u, t)$  bezeichnet das Gewicht der jeweils neuen Kante. Ferner wird mit  $va(z)$  derjenige Knoten in dem Verschiebegrphen  $vg$  bezeichnet, welcher den jeweiligen Beginn des Zeitintervalls  $z$  repräsentiert.

10

Weiterhin wird eine Fahrzeit  $t_{edge}$  für eine Streckenlänge der Kante  $e$  und eine Fahrzeit  $t_{len}$  für eine Streckenlänge, welche gleich der Länge des Verkehrsmittels  $V_i$  ist, eingeführt.

Bei der Generierung der neuen Kanten werden im weiteren unterschiedliche Fälle aufgeführt. Dabei wird jeweils angegeben, wie der Kantenparameter  $cost(u, t)$  festzulegen ist. Die große Anzahl der unterschiedlichen Fälle wird dadurch verursacht, daß die Knotenzahl in dem Verschiebegrphen  $vg$  minimiert wurde. Beispielsweise führt die Elimination der Knoten, welche die Zeitwerte der Konfliktintervalle repräsentieren, dazu, daß vom Knoten  $va(z)$  zum Knoten  $va(gn(kiz))$  eine Kante generiert werden muß, um Überlappfreiheit zwischen den Intervallen  $kiz$  und  $gn(kiz)$  zu gewährleisten (siehe Gleichung 3).

25

Ohne Elimination dieser Knoten würde man einfach eine Kante von  $va(kiz)$  nach  $va(gn(kiz))$  generieren, was in Gleichung (2) dargestellt ist.

30  $u = va(z)$  und  $t = va(zn(z))$  (1)  
Hierbei gilt  $cost(u, t) = t_{edge}$

$u = va(z)$  und  $t = va(gn(z))$  (2)  
Hierbei gilt  $cost(u, t) = t_{edge} + t_{len} + zs$

35

$u = va(z)$  und  $t = va(z)$  (3)  
Es gilt  $kir = gn(r)$

Hierbei gilt  $\text{cost}(u, t) = \text{tedge} + \text{tlen} + \text{zs}$

$u = \text{va}(z)$  und  $t = \text{va}(\text{gn}(\text{kiz}))$  (4)

Hierbei gilt  $\text{cost}(u, t) = \text{tedge} + \text{tlen} + \text{zs}$

5

$u = \text{va}(z)$  und  $t = \text{va}(r)$  (5)

Es gilt  $\text{kir} = \text{gn}(\text{kiz})$

Hierbei gilt  $\text{cost}(u, t) = \text{tedge} + \text{tlen} + \text{zs}$

10  $u = \text{va}(z)$  und  $t = \text{va}(\text{gn}(\text{zp}(z)))$  (6)

Hierbei gilt  $\text{cost}(u, t) = \text{tlen} + \text{zs}$

$u = \text{va}(z)$  und  $t = \text{va}(r)$  (7)

Es gilt  $\text{kir} = \text{gn}(\text{zp}(z))$

15 Hierbei gilt  $\text{cost}(u, t) = \text{tlen} + \text{zs}$

$u = \text{va}(z)$  und  $t = \text{gn}(\text{kizp}(z))$  (8)

Hierbei gilt  $\text{cost}(u, t) = \text{tlen} + \text{zs}$

20  $u = \text{va}(z)$  und  $t = \text{va}(r)$  (9)

Es gilt  $\text{kir} = \text{gn}(\text{kizp}(z))$

Hierbei gilt  $\text{cost}(u, t) = \text{tlen} + \text{zs}$

25 Ein Index  $r$  bezeichnet jeweils ein weiteres Zeitintervall ungleich dem jeweiligen Zeitintervall  $z$ .

Ein Sonderfall führt zu vier weiteren Fällen, nämlich wenn das Verkehrsmittel  $V_i$  auf mehreren Kanten steht, das heißt wenn die Länge des Verkehrsmittels  $V_i$  größer ist als die Länge der Kante selbst. Diese vier Fälle erhält man aus den Gleichungen (6), (7), (8) und (9), indem man  $u = \text{va}(z)$  durch  $u = \text{va}(\text{zn}(z))$  ersetzt.

35 Zur Verdeutlichung dieses im vorigen beschriebenen Vorgehens ist in Figur 8 der Verschiebegrph  $vg$  zum Belegungsplan  $BP$  aus Figur 4 dargestellt. Die Kanten des Verschiebegrphen  $vg$

sind indiziert mit der jeweiligen Nummer des Falles bzw. der jeweiligen Gleichung gemäß der oben dargestellten Übersicht.

5 Zur Verdeutlichung der Vorteile, die das Verfahren aufweist, ist in den Figuren 5a und 5b für die jeweilige Topologie eines zweiten Ausführungsbeispiels in den Figuren 5a und 5b angegebenen Liniennetzes LN mit einer Verengung Ver, die nur von einem Verkehrsmittel Vi zu einem bestimmten Zeitpunkt belegt werden kann, in einem Wegzeitdiagramm die vorgegebenen  
10 Fahrzeiten von drei Verkehrsmitteln mit hoher Priorität V1, V2, V3 und einem Verkehrsmittel mit niedrigerer Priorität V4 dargestellt.

15 In Figur 5b ist eine auftretende Störung und eine damit verbundene Verspätung des Verkehrsmittels V2 dargestellt. Diese Verspätung führt zu einer Vergrößerung eines Zeitintervalls  $t_{12}$ , das zwischen dem ersten Verkehrsmittel V1 und dem zweiten Verkehrsmittel V2 liegt. Dieses Zeitintervall  $t_{12}$  wird durch die Verspätung vergrößert zu einem neuen Zeitintervall  
20  $t'_{12}$ .

Die bekannten Verfahren würden, wie in Figur 6a dargestellt, keine Umdisponierung des einzelnen Verkehrsmittels vornehmen, da kein Konflikt vorliegt.

25 Durch das erfindungsgemäße Verfahren wird jedoch eine gesamte Neugenerierung des Belegungsplans BP durchgeführt ohne daß eine Konflikterkennung dazu notwendig wäre. Dies führt dazu, daß wie in Figur 6b dargestellt ist, die entstandene Zeitlücke  $t'_{12}$  dazu genutzt wird, daß das vierte Verkehrsmittel V4  
30 mit niedrigerer Priorität in diesem Zeitintervall  $t'_{12}$  auf einer Verengung Ver des Liniennetzes LN fahren zu lassen, ohne damit die vorgegebenen Fahrzeiten der Verkehrsmittel V2 und V3 zu beeinflussen. Damit wird eine globale Verbesserung  
35 des gesamten Fahrverhaltens erreicht.

Das Verfahren kann beispielsweise in periodischen Zeitabständen, deren Größe je nach Anwendung unterschiedlich ist, oder auch in unregelmäßigen Zeitabständen durchgeführt werden.

- 5 Es ist in einer Weiterbildung des Verfahrens ebenso vorgesehen, daß das Verfahren durchgeführt, wenn Störungen in dem Liniennetz LN und/oder bei den Verkehrsmitteln Vi und/oder sonstige Störungen aufgetreten sind, die den Verkehrsfluß beeinflussen gemeldet werden. Diese Störungsmeldungen werden  
10 empfangen und gespeichert.

- Unter einer Störung ist in diesem Zusammenhang beispielsweise ein Fall zu verstehen, wenn ein Teil TLNj des Liniennetzes LN ausfällt oder blockiert ist. In diesem Fall kann ein neuer  
15 Belegungsplan BP unter Berücksichtigung der gemeldeten Störungen ermittelt werden.

- Desweiteren ist es vorgesehen, Anschlußbeziehungen zwischen Verkehrsmitteln VI bei der Regelung und somit in dem Belegungsplan zu berücksichtigen, indem einfach abhängige Ankunfts- und Abfahrtszeiten der Verkehrsmittel Vi generiert werden. Dies bedeutet, daß für ein Verkehrsmittel Vi dieser Fall, daß es auf ein anderes Verkehrsmittel warten muß, in dem Belegungsplan BP berücksichtigt werden muß.  
25

- Es ist ebenso in einer Weiterbildung des Verfahrens vorgesehen, bei der Generierung des Belegungsplans (BP) mindestens eine der folgenden Nebenbedingungen zu berücksichtigen:
- Art des Verkehrsmittels (Vi),
  - 30 - Gewicht des Verkehrsmittels (Vi),
  - Länge des Verkehrsmittels (Vi),
  - Höchstgeschwindigkeit des Verkehrsmittels (Vi),
  - vorgegebene Haltestellen des Verkehrsmittels (Vi) auf der Route,
  - 35 - Mindestaufenthaltszeit des Verkehrsmittels (Vi) an den vorgegebenen Haltestellen,

- frühestmögliche Abfahrtszeit des Verkehrsmittels ( $V_i$ ) von den vorgegebenen Haltestellen,
- topologische Nebenbedingungen der einzelnen Teile des Liniennetzes (LN).

5

Für den möglichen Fall, daß nicht nur eine mögliche Reihenfolge der Verkehrsmittel  $V_i$  auf dem Liniennetz LN vorge-schrieben ist, sondern mehrere, ist es vorgesehen, alle möglichen vorgegebenen Auftragsreihenfolgen für die Verkehrsmittel  $V_i$  zu verplanen, das heißt für jede mögliche Auftragsreihenfolge das Verfahren durchzuführen, und das Ergebnis einer Zielfunktion, die beispielsweise in einer gewichteten Summe ermittelter Verspätungen der Verkehrsmittel  $V_i$  beschreibt, speichert.

15

Eine optimale Auftragsreihenfolge ist diejenige, die von allen möglichen Auftragsreihenfolgen den geringsten Wert in der Zielfunktion aufweist.

- 20 Die Zielfunktion kann jeweils abhängig von dem Anwendungsgebiet und den Schwerpunkten der Optimierung auch andere Parameter aufweisen, beispielsweise die Gewichtung von Verspätungen, die eine vorgegebene Schwelle überschreiten müssen, um überhaupt berücksichtigt zu werden. Weitere Aspekte, die an-
- 25 wendungsabhängig zu einer Veränderung der Zielfunktion führen, können ohne Einschränkungen in dem Verfahren berücksichtigt werden.

- 30 Zur weiteren Verbesserung des Verfahrens ist es möglich, jeweils nur den Ergebniswert der Zielfunktion bei Durchführung des Verfahrens für jede mögliche Auftragsreihenfolge zu speichern und nicht alle Parameter für die jeweilige Zuordnung. In diesem Fall muß, nachdem die optimale Auftragsreihenfolge gefunden wurde, für diese Auftragsreihenfolge das Verfahren
- 35 noch einmal durchgeführt werden. Diese Vorgehensweise weist hinsichtlich der Nutzung des Speicherbedarfs des das Verfahren durchführenden Rechners erhebliche Vorteile auf.



Das Verfahren des „Ausprobierens“ aller möglichen Auftragsreihenfolgen kann durch ein Beschränken der auszuprobierenden Möglichkeiten weitergebildet werden.

5

Zur Verdeutlichung wird eine Annahme getroffen, daß genau  $f$  Aufträge zu verplanen sind und  $g$  Aufträge bereits verplant wurden. In diesem Fall läßt sich folgende untere Schranke für den Zielfunktionswert angeben, den man nach der Verplanung der restlichen  $o = f - g$  Aufträge erhält:

10

Es werden die Restaufträge  $o$  einzeln unter Berücksichtigung der schon verplanten Aufträge  $g$  verplant. Im folgenden werden die Zielfunktionswerte der  $o$  Einzelplanungen zum Zielfunktionswert der schon durchgeführten  $g$  Planungen addiert. Ist die dadurch berechnete untere Schranke größer oder gleich dem Zielfunktionswert der bisher besten Auftragsreihenfolge  $P_{opt}$ , welche während des Verfahrens laufend aktualisiert wird, dann kann keine der  $o$  (! bedeutet in diesem Zusammenhang Fakultät, also alle Permutationen der  $o$  Auftragsreihenfolgen)  $o$  Auftragsreihenfolgen besser sein als die Auftragsreihenfolge  $P_{opt}$ . Folglich brauchen diese Auftragsreihenfolgen nicht mehr berücksichtigt werden.

15

20

Weiterhin kann eine Optimierung der Reihenfolge der Verzweigung vorgenommen werden. Hierbei wird nach der Planung von  $g$  Aufträgen die restlichen  $o$  Aufträge, die noch zu verplanen sind, der Reihe nach probeweise verplant. Die Reihenfolge, in der diese probeweise Verplanung stattfindet, kann optimiert werden, indem als erstes derjenige Auftrag verplant wird, welcher unter allen  $o$  Aufträgen den geringsten Zuwachs am Zielfunktionswert verursacht. Demgemäß werden noch vor dem Verzweigen alle  $o$  Aufträge in bezug auf diesen Zuwachs aufsteigend sortiert.

30

35

Der im vorigen beschriebene Branch-and-Bound-Algorithmus kann mit Hilfe zweier Parameter beschleunigt werden:

- Eine Branch-Schranke  $bs$ .

5 Wurden beim exakten Verfahren bereits  $g$  Aufträge bearbeitet, dann standen als nächstes genau  $o$  Aufträge zur Auswahl für die weitere Verplanung. Mit der Branch-Schranke  $bs$ , die kleiner ist als die Zahl der Aufträge  $f$  insgesamt, wird die Anzahl der Aufträge, welche zur Auswahl stehen, auf den Wert der Branch-Schranke  $bs$  beschränkt.

- 10 - Ein Streckungsfaktor  $sf$ .

Bei dieser Option wird die berechnete untere Schranke mit dem Streckungsfaktor  $sf$ , dessen Wert größer als 1 ist, multipliziert. Dies ist äquivalent dazu, daß man sich vorstellt, man hätte eine bessere untere Schranke. Der Streckungsfaktor  $sf$  wird gestaffelt festgelegt, und zwar proportional zu der Anzahl der noch zu verplanenden Aufträge  $o$ .  
15 Dabei gilt:  $sf = 1$  für  $o = f$ .

20 Das erfindungsgemäße Verfahren sowie alle im vorigen beschriebenen Weiterbildungen des Verfahrens können für unterschiedliche Anwendungsgebiete eingesetzt werden.

So ist es zum Beispiel vorgesehen, wie im vorigen beschrieben wurde, das Verfahren für schienengebundene Verkehrsmittel  $Vi$   
25 einzusetzen.

Es ist ferner vorgesehen, das Verfahren einzusetzen zur Regelung von Flugzeugen. In diesem Fall entspricht das Liniennetz mit den einzelnen Teilen  $TLN_j$  des Liniennetzes  $LN$  den den  
30 einzelnen Flugzeugen auf einer Flugroute zugeordneten Luftkorridoren.

Ein weiteres Anwendungsgebiet des Verfahrens liegt in der Disposition von Sammelhaltepunkten. Hierbei ist die Vorgehensweise derart, daß zuerst die Verkehrsmittel  $Vi$  den jeweiligen Haltepunkten des Sammelhaltepunkts zugeordnet werden,  
35

und dann für jedes Verkehrsmittel  $V_i$  die optimale Route berechnet wird.

Das Verfahren kann außerdem vorteilhaft verwendet werden zur  
5 Erstellung von Sollfahrplänen für die Verkehrsmittel  $V_i$ .

Allgemein ist das Verfahren selbstverständlich für jede Art  
von Netzdispositionen einsetzbar, da das Verfahren keine Speziallösung darstellt, sondern für allgemeine Netzwerkgraphen  
10 anwendbar ist.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Regelung von Verkehrsmitteln ( $V_i$ ;  $i = 1 - m$ ),
- 5       - bei dem die Verkehrsmittel ( $V_i$ ) mit vorgegebenen Ankunftszeiten und vorgegebenen Abfahrtszeiten der Verkehrsmittel ( $V_i$ ) und vorgegebenen Sequenzen von Start- und Zielpunkten der Verkehrsmittel ( $V_i$ ) in einem Liniennetz (LN) in Form
- 10       eines ungerichteten Netzwerkgraphen dargestellt wird,
- bei dem ein Belegungsplan (BP), in dem freie Zeitintervalle des Belegungsplans (BP) in Form eines Intervallgraphen (IG) dargestellt werden, durch den Teile des Liniennetzes ( $TLN_j$ ;  $j = 1 - n$ ) zu bestimmten Zeitintervallen bestimmten Ver-
- 15       kehrsmitteln ( $V_i$ ) zugeordnet werden, durch einen Rechner generiert wird, indem alle Verkehrsmittel ( $V_i$ ) sequentiell entsprechend wählbarer Prioritäten der Verkehrsmittel ( $V_i$ ) und der Sequenzen von Start- und Zielpunkten der Verkehrsmittel ( $V_i$ ) den jeweils von den Verkehrsmitteln ( $V_i$ ) benötigten Teilen ( $TLN_j$ ) des Liniennetzes (LN) zugeordnet werden, wobei
- 20       -- Knoten des Intervallgraphen (IG) Zeitintervalle zugeordnet werden, in denen der entsprechende Teil ( $TLN_j$ ) des Liniennetzes (LN) noch nicht belegt ist,
- 25       -- Kanten des Intervallgraphen (IG) mögliche Routen für die Verkehrsmittel ( $V_i$ ) unter Berücksichtigung örtlicher und zeitlicher Einschränkungen, die sich mindestens aus der Topologie des Liniennetzes und den vorgegebenen Ankunftszeiten und Abfahrtszeiten der Verkehrsmittel ( $V_i$ ) ergeben, zugeordnet werden,
- 30       -- dem jeweiligen Verkehrsmittel ( $V_i$ ) unter Verwendung eines Kürzesten-Wege-Verfahrens (Shortest Path Algorithm) eine optimale Route in dem Intervallgraphen (IG) zugeordnet wird (05),
- 35       -- freie Zeitintervalle der einzelnen Teile ( $TLN_j$ ) des Liniennetzes (LN) angepaßt werden (06) an die Belegung des

- Linienetzes (LN) durch das jeweilige Verkehrsmittel (Vi), und
- bei dem die Verkehrsmittel entsprechend den Anforderungen des Belegungsplans (BP) geregelt werden (08).
- 5
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem ein alter Belegungsplan (BP') zu Beginn des Verfahrens vollständig gelöscht (02) wird.
- 10
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,
- bei dem empfangene gemeldete Störungen über das Liniennetz (LN) und/oder über die Verkehrsmittel (Vi) und/oder sonstige Störungen, die den Verkehrsfluß beeinflussen, gespeichert werden, und
- 15
- bei dem daraufhin der Belegungsplan (BP) neu generiert wird unter Berücksichtigung der empfangenen Störungen.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, bei dem auftretende Konflikte in dem Belegungsplan (BP) durch
- 20
- Wartezeiten, die den Verkehrsmitteln mit vergleichsweise niedrigerer Priorität zugeordnet werden, gelöst werden.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, bei dem als Kürzestes-Wege-Verfahren (Shortest Path Algorithm) ein Dijkstra Algorithmus vorgesehen wird.
- 25
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, bei dem als Kürzestes-Wege-Verfahren (Shortest Path Algorithm) ein Moore Algorithmus vorgesehen wird.
- 30
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, bei dem die Prioritäten der Verkehrsmittel (Vi) nach mindestens einem der folgenden Kriterien ermittelt werden :
- eine vorgebbare Bedeutung der einzelnen Verkehrsmittel (Vi),
- 35
- Geschwindigkeiten der einzelnen Verkehrsmittel (Vi),

- vorgegebene Abfahrtszeiten der einzelnen Verkehrsmittel ( $V_i$ ),
  - vorgegebene Ankunftszeiten der einzelnen Verkehrsmittel ( $V_i$ ),
  - 5 - Verspätungen der nach den einzelnen Verkehrsmittel ( $V_i$ ).
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7,  
bei dem Anschlußbedingungen der Verkehrsmittel ( $V_i$ ) bei der  
Generierung des Belegungsplans (BP) berücksichtigt werden.
- 10
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8,
- bei dem zu Beginn des Verfahrens ein vorgegebener Sicherheitsabstand der Verkehrsmittel ( $V_i$ ) auf mindestens einem Teil ( $TLN_j$ ) des Liniennetzes (LN) reduziert wird (20),
  - 15 - bei dem nach Beendigung des Verfahrens (V) der reduzierte Sicherheitsabstand wieder erhöht wird auf den vorgegebenen Sicherheitsabstand (21),
  - bei dem ein Verschiebegrabgraph (vg) generiert wird (22),
  - bei dem der Verschiebegrabgraph (vg) dekomprimiert wird (23),
  - 20 - bei dem der Verschiebegrabgraph (vg) komprimiert wird (24), und
  - bei dem der Belegungsplan (BP) entsprechend des komprimierten Verschiebegrabgraphens (vg) angepaßt wird.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9,
- 25 - bei dem, wenn unterschiedliche Reihenfolgen der Verkehrsmittel ( $V_i$ ) in dem Liniennetz (LN) möglich sind, das Verfahren für mindestens zwei mögliche Reihenfolgen durchgeführt wird, und
  - bei dem die Regelung der Reihenfolge als eine optimale Regelung verwendet wird, die für eine vorgebbare Zielfunktion
  - 30 einen optimalen Wert ergibt.
11. Verfahren nach Anspruch 10,  
bei dem ein Branch-and-Bound-Verfahren zur Reduktion der Anzahl zu untersuchender Reihenfolgen der Verkehrsmittel in dem  
35 Liniennetz (LN) vorgesehen wird.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11,  
bei dem die Regelung der Verkehrsmittel (Vi) erfolgt durch  
Regelung der Haltezeiten der Verkehrsmittel (Vi) an Halte-  
punkten des Liniennetzes (LN) und/oder durch Regelung der Ge-  
5 schwindigkeiten der Verkehrsmittel (Vi).
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12,  
bei dem ein möglicher Gleiswechselbetrieb bei der Generierung  
des Belegungsplans berücksichtigt (BP) wird.
- 10 14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13,  
bei dem bei der Generierung des Belegungsplans (BP) minde-  
stens eine der folgenden Nebenbedingungen berücksichtigt wer-  
den:
- 15 - Art des Verkehrsmittels (Vi),  
- Gewicht des Verkehrsmittels (Vi),  
- Länge des Verkehrsmittels (Vi),  
- Höchstgeschwindigkeit des Verkehrsmittels (Vi),  
- vorgegebene Haltestellen des Verkehrsmittels (Vi) auf der  
20 Route,  
- Mindestaufenthaltszeit des Verkehrsmittels (Vi) an den vor-  
gegebenen Haltestellen,  
- frühestmögliche Abfahrtszeit des Verkehrsmittels (Vi) von  
den vorgegebenen Haltestellen,  
25 - topologische Nebenbedingungen der einzelnen Teile des Lini-  
ennetzes (LN).
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13,  
- bei dem das Verfahren eingesetzt wird zur Regelung der Ver-  
kehrsmittel (Vi) an einem Sammelhaltepunkt mehrerer Ver-  
30 kehrsmittel, und  
- bei dem zu Beginn des Verfahrens die Verkehrsmittel (Vi)  
bestimmten vorgegebenen Teilen des Liniennetzes (LN) zuge-  
ordnet werden.
- 35 16. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13,

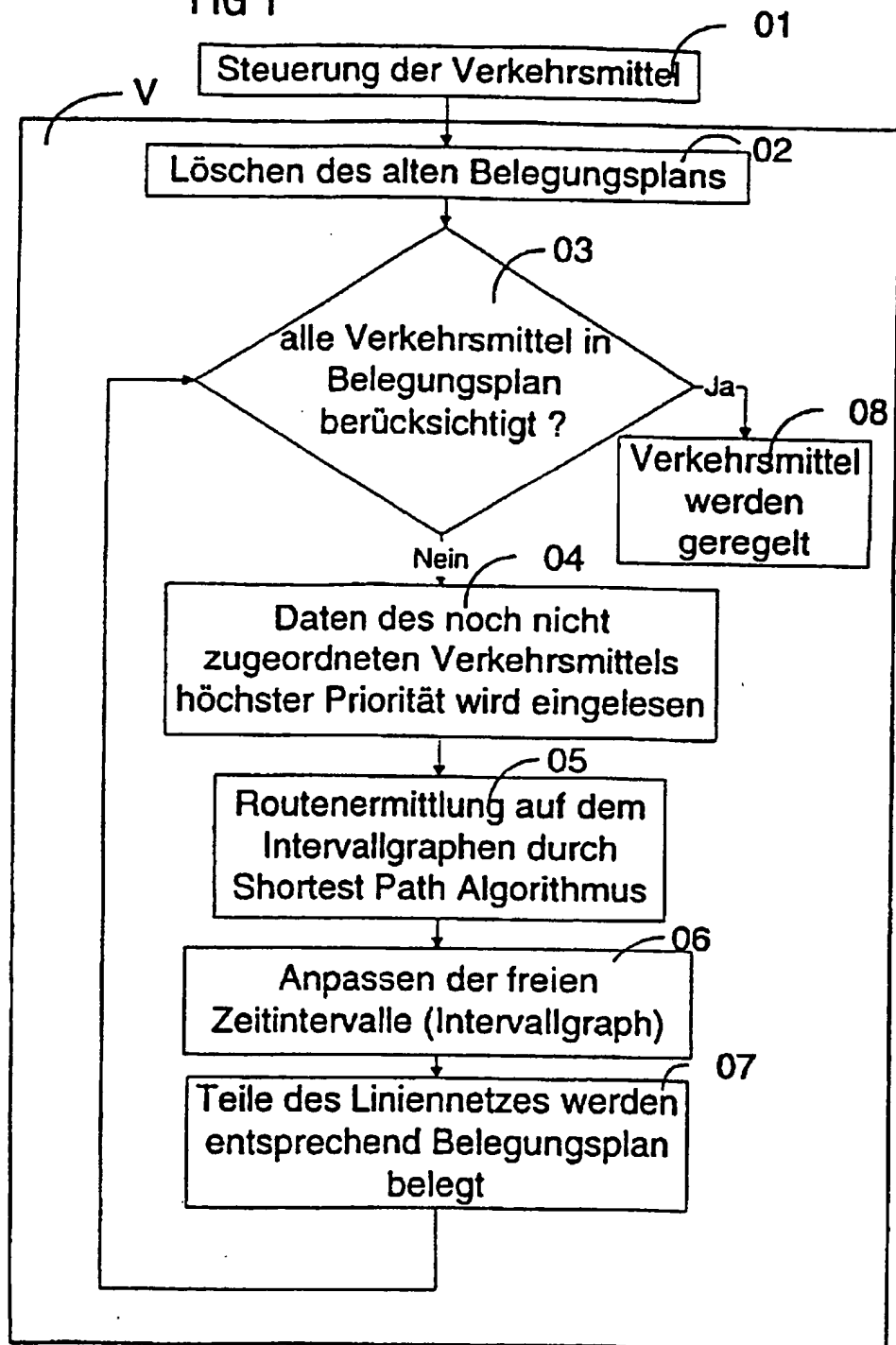
- bei dem das Verfahren eingesetzt wird zu Regelung von Flugzeugen, und
- bei dem die Teile (TLN<sub>j</sub>) des Liniennetzes (LN) durch Luftkorridore, die jeweils eindeutig in einem Zeitintervall den  
5 einzelnen Flugzeugen zugeordnet werden.

17. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13,  
bei dem der Belegungsplan (BP) verwendet wird zur Erstellung  
von Sollfahrplänen für die Verkehrsmittel (Vi).



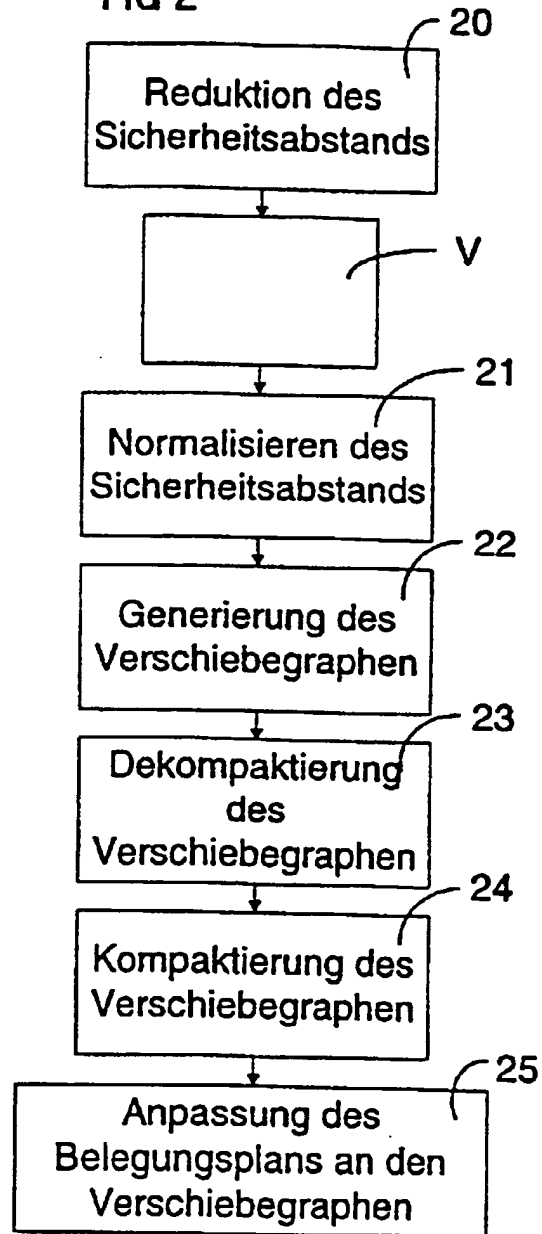
1/6

FIG 1



2/6

FIG 2



3/6

FIG 3

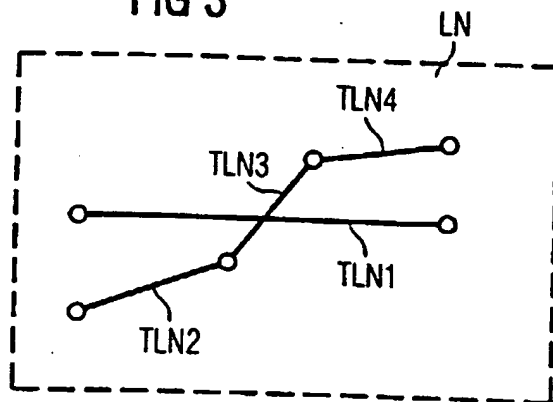
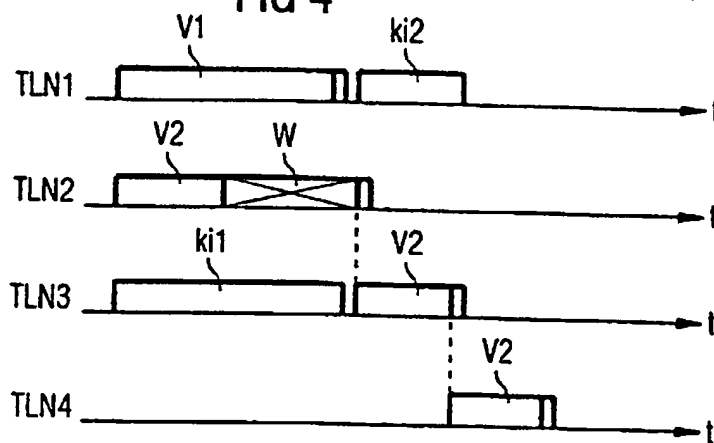


FIG 4



4/6

FIG 5a

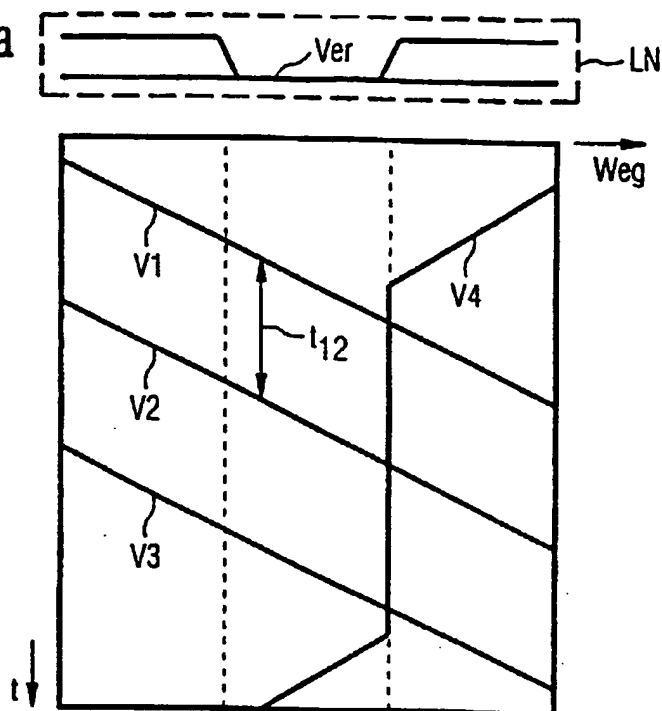
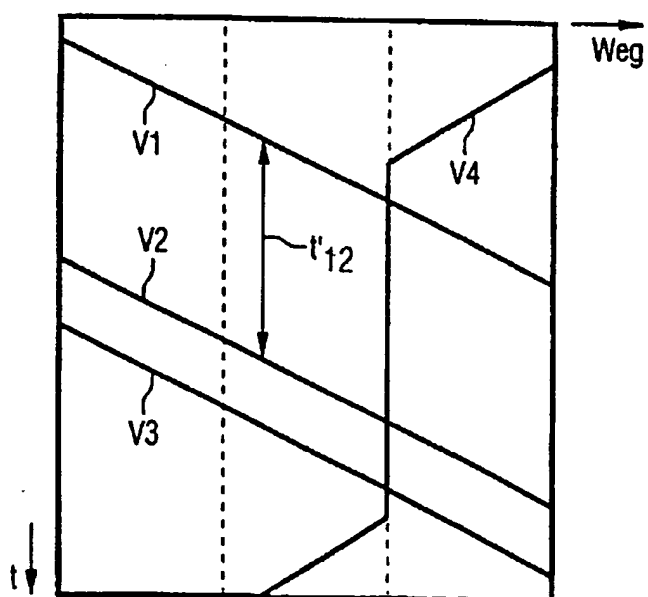


FIG 5b



5/6

FIG 6a

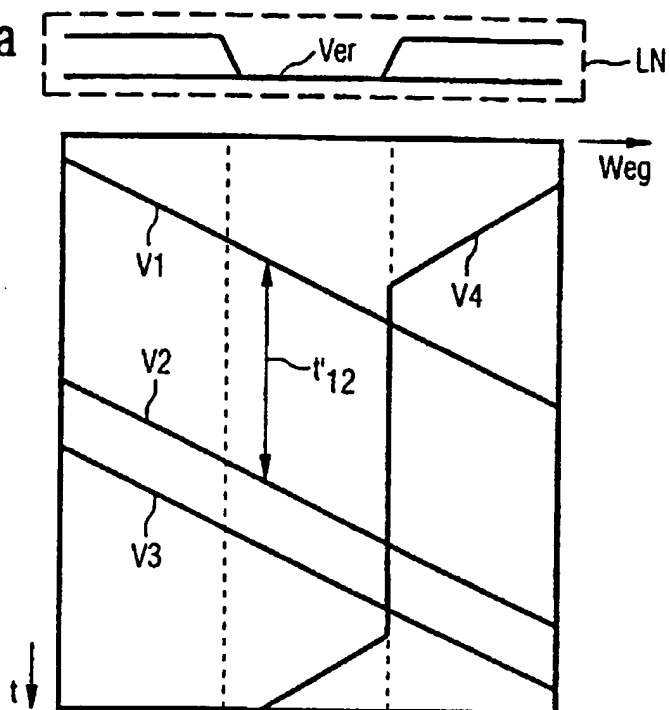
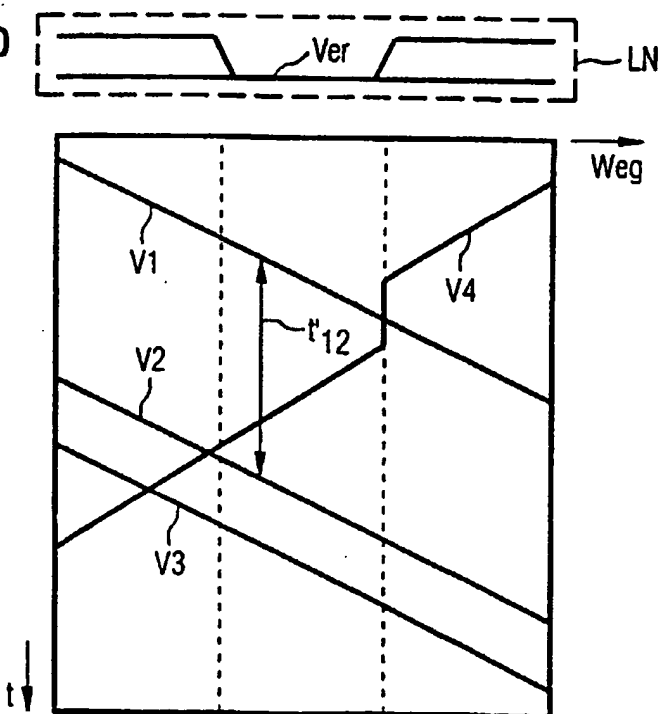


FIG 6b



6/6

FIG 7

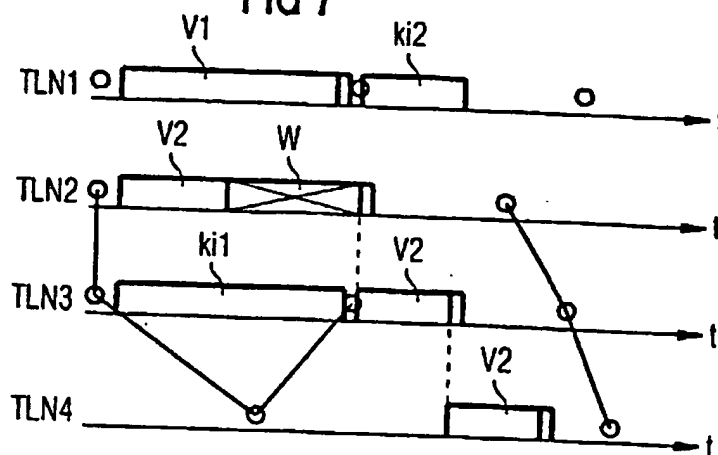


FIG 8

